



# Piezolan



Ausgabe 1976

Abbildungen und Werte gelten nur bedingt als Unterlagen für Bestellungen.  
Rechtsverbindlich ist jeweils die Auftragsbestätigung · Änderungen vorbehalten

Exporteur:

*Elektrotechnik*

Export-Import

Volkseigener Außenhandelsbetrieb  
der Deutschen Demokratischen Republik

DDR-102 Berlin, Alexanderplatz  
Haus der Elektroindustrie

KOMBINAT VEB KERAMISCHE WERKE HERMSDORF · DDR 653 HERMSDORF / THURINGEN

Fernsprecher: Hermsdorf, Sa.-Nr. 5 10

Drahtwort: Kaweha Hermsdorfthür

Telex: 058 246



## 1. Allgemeine Einführung

Piezoelektrische Materialien sind auf Grund der hervorragenden Möglichkeiten der Energieumwandlung sehr gut in die Technik eingeführt. Entsprechend der Natur des Piezoeffektes bietet sich sowohl die mechanisch-elektrische Energieumwandlung (direkter Piezoeffekt) als auch die elektrisch-mechanische Energieumwandlung (reziproker Piezoeffekt) an.

Durch die Entwicklung der polykristallinen (keramischen) piezoelektrischen Werkstoffe, ausgehend vom Bariumtitanat, lassen sich viele Anwendungsfälle bequem realisieren. Die keramische Herstellungsmethode synthetischer piezoelektrischer Werkstoffe ist nicht nur relativ billig, insbesondere im Hinblick auf eine Massenproduktion, keramische Körper lassen sich auch in den unterschiedlichsten Formen herstellen, die oft bei einkristallinen Werkstoffen überhaupt ausgeschlossen sind, außerdem hat es sich herausgestellt, daß die Modifikation des Piezoeffektes der Keramik in verschiedener Hinsicht möglich ist. Besonders geeignet sind dazu die neueren Mischkeramiken auf der Basis des Blei-Zirkonat-titanat, die sich im allgemeinen durch einen sehr großen piezoelektrischen Effekt und Beständigkeit auszeichnen.

Bei den keramischen piezoelektrischen Materialien handelt es sich um ferroelektrische Materialien, die mehr oder weniger ausgeprägte Temperaturabhängigkeiten der dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften vor allem in der Umgebung eines sogenannten Curiepunktes zeigen, an dem eine kristallografische Phasenumwandlung vor sich geht. Unterhalb dieses Curiepunktes ist bei Einstellung eines bestimmten Ordnungszustandes der Piezoeffekt der Keramik zu erwarten.

Infolge des polykristallinen Gefüges der interessierenden Keramiken sind die Materialien zunächst isotrop und zeigen keinen Piezoeffekt. Wird aber an einen solchen keramischen Körper über Elektroden ein elektrisches Gleichfeld angelegt, stellt sich eine bevorzugte Orientierung von Dipolbereichen (Domänen) durch Polarisation in Richtung einer „polaren“ Achse, die eine Bedingung für das Auftreten eines mehr oder weniger ausgeprägten Piezoeffektes ist, ein. Entscheidend ist dabei, daß die polarisierten (gepolten) Keramiken bei Wegnahme des Gleichfeldes die bevorzugte Orientierung behalten (remanente Polarisation). Die ferroelektrische Keramik wird damit dem piezoelektrischen Einkristall sehr ähnlich. Die dielektrischen und elektromechanischen Eigenschaften sind anisotrop. Das Verhalten des jeweiligen Wandlers hängt zudem noch von seinen geometrischen Verhältnissen ab.

## 2. Begriffe zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der piezoelektrischen Materialien

Unter normalen Betriebsbedingungen bestehen bei der gepolten piezoelektrischen Keramik wie bei den piezoelektrischen Kristallen lineare Beziehungen zwischen den elastischen Spannungs- und Deformationskomponenten bzw. den Komponenten des elektrischen Feldes und der dielektrischen Verschiebung. Diese linearen Beziehungen werden durch richtungsabhängige Konstanten beschrieben, die entsprechend den verwendeten abhängigen und unabhängigen Variablen in Definitionsbeziehungen auftreten, die die möglichen elektromechanischen Zusammenhänge beschreiben.

Verabredungsgemäß werden für die Variablen folgende Symbole verwendet.

- D = Deformation
- S = mechanische Spannung (Zug, Druck)
- T = elektrische Feldstärke
- E = dielektrische Verschiebung

Die mechanischen, elektrischen und elektromechanischen Eigenschaften, vermittelt durch die jeweiligen richtungsabhängigen Konstanten der piezoelektrischen Materialien, werden in rationalisierten mks-Einheiten ausgedrückt.

### 2.1. Elastische Konstanten

Die elastischen Konstanten beschreiben den Zusammenhang zwischen der Deformation S und der mechanischen Spannung T oder der mechanischen Spannung T und der Deformation S.

Demzufolge unterscheidet man zwischen der elastischen Nachgiebigkeit oder schlechthin dem „Elastizitätskoeffizienten“ s und dem elastischen Steifigkeitskoeffizienten oder dem „Elastizitätsmodul“ c. Dabei sind die elektrischen Grenzbedingungen infolge der Wechselwirkung von mechanischer (elastischer) und elektrischer Energie zu beachten,

$$\begin{aligned} s^E &= \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_E & s^D &= \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_D \\ c^E &= \left( \frac{\partial T}{\partial S} \right)_E & c^D &= \left( \frac{\partial T}{\partial S} \right)_D \end{aligned}$$

z. B. ist  $s^E$  die elastische Nachgiebigkeit bei konstanter elektrischer Feldstärke.

### 2.2. Dielektrizitätskonstanten (DK)

In die dielektrischen Eigenschaften, die durch die Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  ausgedrückt werden, gehen infolge der Wechselwirkung von mechanischer und elektrischer Energie die mechanischen Grenzbedingungen ein



$$\epsilon_T = \left( \frac{\partial D}{\partial E} \right)_T \text{ freie DK}$$

$$\epsilon_S = \left( \frac{\partial D}{\partial E} \right)_S \text{ geklemmte DK.}$$

Das Verhältnis aus der absoluten DK und der DK des freien Raumes  $\epsilon_0$  ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ) ergibt die relative DK  $\epsilon_r$ , die häufig verwendet wird.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_T}{\epsilon_0}$$

## 2.3. Piezoelektrische Konstanten

Die gewöhnlich verwendeten elektromechanischen Konstanten sind der elektromechanische Kopplungsfaktor  $k$ , die Deformationskonstante  $d$  und die Druckkonstante  $g$ . Außerdem ist in bestimmten Fällen die piezoelektrische Spannungskonstante  $e$  von Interesse.

### 2.3.1. Kopplungsfaktor $k$

Der elektromechanische Kopplungsfaktor  $k$  wird allgemein verwendet. Er ist ein Maß für die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische und umgekehrt.

Das Quadrat des Kopplungsfaktors ist gleich der umgewandelten Energie dividiert durch die gesamte eingespeiste Energie.

### 2.3.2. Piezoelektrische $d$ -Konstante (Piezomodul)

Die  $d$ -Konstante liefert die für eine vorgegebene Feldstärke spezifische Deformation bei konstanter äußerer Spannung, daher ist

$$d = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right)_T$$

### 2.3.3. Piezoelektrische $g$ -Konstante

Die  $g$ -Konstante gibt die Leerlaufspannung bei gegebener elastischer Spannung an und wird oft als elasto-elektrischer Koeffizient (Piezoelektrische Druckkonstante) bezeichnet:

$$g = - \left( \frac{\partial E}{\partial T} \right)_D$$

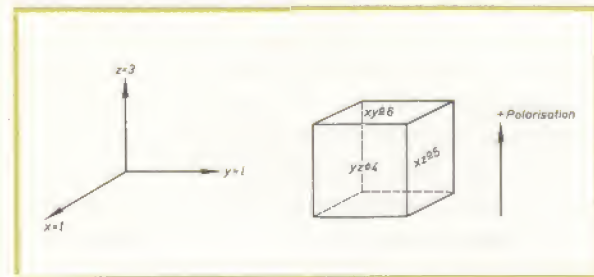
### 2.3.4. Piezoelektrische Spannungskonstante $e$

Bei einem an den Enden fest eingespannten piezoelektrischen Element ist der „ $e$ “-Koeffizient die bei einer bestimmten Feldstärke gemessene Druck- oder Zugspannung

$$e = - \left( \frac{\partial T}{\partial E} \right)_S$$

## 3. Die Richtungsabhängigkeit der elastischen, dielektrischen und piezoelektrischen Konstanten gepolter ferroelektrischer Keramik

Die unpolarisierte isotrope Keramik wird nach der Polarisation im elektrischen Gleichfeld ein Material mit einer zweidimensionalen Isotropie in der zur Polarisationsrichtung senkrechten Ebene. Die gepolte Keramik läßt sich kristallografisch einordnen. Die polare Achse der Keramik wird dabei als  $z$ -Achse angenommen, und jede hierzu senkrechte Richtung kann als  $x$ -Achse gewählt werden. Die in der gepolten Keramik vorliegenden Beziehungen werden am besten für einen Quader erläutert.



Neben den Ziffern 1–3 werden die Ziffern 4–6 verwendet, die die Flächen bezeichnen. Damit wird eine doppelte Indizierung der den keramischen Körper beschreibenden Konstanten sinnvoll, die in folgender Weise benutzt wird:

Der erste Index bezeichnet beispielsweise die Richtung des angelegten elektrischen Feldes, der zweite Index die Richtung der geometrischen Deformation unter Einwirkung des Feldes.

Zur Vorpolarisation des Quaders in Richtung 3 seien Elektroden an den beiden Flächen  $xy = 6$  angebracht. Wirkt ein elektrisches Anregungsfeld in Polarisationsrichtung, deformiert sich der Quader in Richtung  $z = 3$ . Die hierfür gültige Piezokonstante ist  $d_{33}$ . Für eine Deformation in Richtung  $x = 1$  wird  $d_{31}$  verwendet. Ein elektrisches Feld senkrecht zur Polarisationsrichtung (Feldelektroden an den Flächen  $yz = 4$ ) bewirkt eine Scherung der Flächen  $xz = 5$ , die zuständige Piezokonstante ist demnach  $d_{15}$ . Neben diesen drei Piezokonstanten ergeben sich unter dem gleichen Gesichtspunkt für die Keramik jeweils fünf elastische Konstanten und zwei Dielektrizitätskonstanten, die von Null verschieden sind:

$$s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{33}, s_{55},$$

$$\epsilon_{11}, \epsilon_{33}.$$

Im allgemeinen gelten auch für die elektromechanischen Kopplungsfaktoren die gleichen Betrachtungen wie für die Piezokonstanten. Diese Kopp-

lungsfaktoren werden jeweils unter konstanten äußeren Spannungen angegeben. Allerdings haben zwei Sonderfälle eine große praktische Bedeutung. Ein Spezialfall ist die Anregung dünner Platten. Die Kopplung wird dann durch  $k_t$  identifiziert. Ein anderer Spezialfall berücksichtigt die Kopplung zwischen elektrischem Feld in Richtung 3 und gleichzeitiger Wirkung in den Richtungen 1 und 2. Diese planare Kopplung wird durch das Symbol  $k_p$  beschrieben.  $k_p$  ist ein sehr wichtiger Faktor, da er sich leicht mit großer Genauigkeit messen läßt und ein einfaches Maß für die Effektivität der Polarisierung von keramischen Testproben darstellt.

#### **4. Anregungszustände**

Die piezoelektrischen Wandler können in zwei große Kategorien unterteilt werden, die sich aus der Möglichkeit der quasistatischen (weit unterhalb der mechanischen Eigenresonanz) und der Resonanzanregung ergeben. Unterhalb der Resonanz betrie-

bene Anordnungen umfassen Tonabnehmer, Mikrofone, Kopfhörer, Accelerometer, Hochspannungsquellen und einige Unterwasser-Schallempfänger (Hydrophone), während sämtliche Ultraschallwandler und Unterwasser-Leistungsschallgeber und auch Wandler für Verzögerungsleitungen und Materialprüfköpfe Resonatoren sind.

Das Gebiet der Betriebsfrequenzen erstreckt sich von den niedrigsten Frequenzen im Hörbereich von 0 Hz bis etwa 10 MHz, wobei die oberen Frequenzen ausschließlich von Resonatoren erfaßt werden, die darüber hinaus in den Harmonischen angeregt werden können.

Die beiden Kategorien der piezoelektrischen Wandler stellen sich in vielfältigen Formen dar. In der Übersicht sind die grundsätzlichen Zustände dargestellt, die durch die zur Verfügung stehenden Konstanten ausreichend beschrieben werden können. Daneben können Resonatoren auch in Form von Ringen, Kugelkalotten und Rohrsegmenten hergestellt werden.

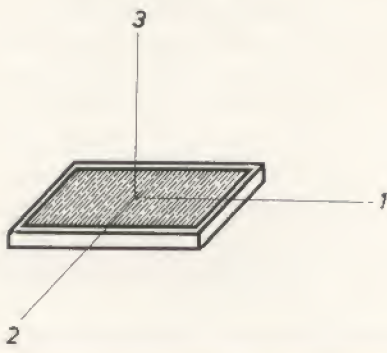
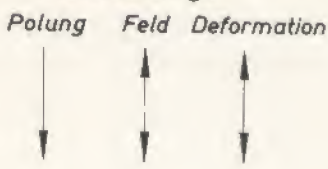
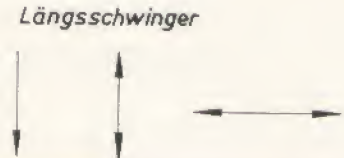
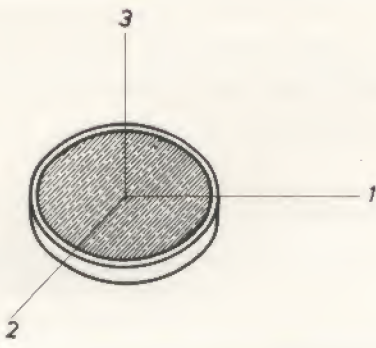


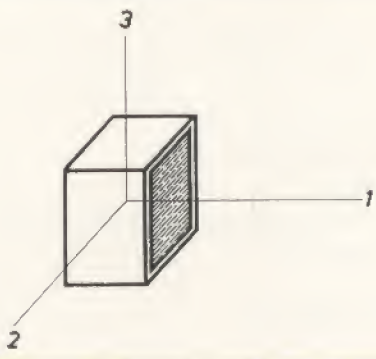

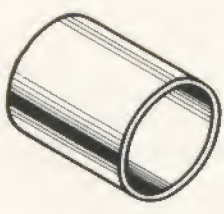





Als Resonanzfrequenz der Ultraschallschwinger wird, falls nicht anders vermerkt, die der Dickenschwingung angegeben. Die jeweilige Wandstärke  $s$  richtet sich dann unter Berücksichtigung der Toleranzen nach der Frequenzkonstanten  $N$  (vgl. 7.1) des verwendeten Werkstoffs. Wenn man unter der

Frequenzkonstanten  $N_d$  (Hz.m) das Produkt aus der Wandstärke  $s$  und der Grundresonanzfrequenz der Dickenschwingung versteht, dann lassen sich die Wandstärken  $s$  (mm) den Resonanzfrequenzen  $f$  (MHz) bei Verwendung der Werkstoffe Piezolan A, F, L, S und S 2 in folgender Tabelle zuordnen:

Resonanzfrequenz $f$	Wandstärke $s$ (mm)				
MHz	Piezolan A	Piezolan F	Piezolan L	Piezolan S	Piezolan S 2
0,25	10,00	7,80	8,40	8,00	8,60
0,30	8,35	6,50	7,00	6,70	7,15
0,40	6,25	4,90	5,25	5,0	5,40
0,50	5,00	3,90	4,20	4,00	4,30
0,80	3,10	3,45	2,60	2,50	2,70
1,00	2,50	1,95	2,10	2,00	2,15
1,25	2,00	1,55	1,70	1,60	1,72
1,50	1,65	1,30	1,40	1,35	1,43
2,00	1,25	0,98	1,05	1,00	1,07
2,40	1,05	0,81	0,88	0,84	0,90
3,00	0,84	0,65	0,70	0,67	0,72
4,00	0,63	0,39	0,53	0,50	0,54
5,00	0,50	0,49	0,42	0,40	0,43
6,00	0,42	0,33	0,35	0,33	0,36
7,50	0,33	0,26	0,28	0,27	0,29
10,00	0,25	0,20	0,21	0,20	0,22

Bei Verwendung anderer Schwingungsformen sind bei der Dimensionierung die betreffenden Frequenzkonstanten, die unter 7.1 aufgeführt sind, zu beachten.

Achsen	elektromechanische Effekte	Konstanten
<p>Platten, Stäbe</p> 	<p>Dickenschwinger</p> <p>Polung    Feld    Deformation</p>  <p>Längsschwinger</p> 	<p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math>  <math>s_{33}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p> <p><math>d_{31}, g_{31}, k_{31}</math>  <math>s_{11}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p>
	<p>Radialschwinger</p>  <p>Dickenschwinger</p> 	<p><math>d_{31}, g_{31}, k_p</math>  <math>s_{11}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p> <p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math>  <math>s_{33}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p>
	<p>Scherschwinger</p> 	<p><math>d_{15}, g_{15}, k_{15}</math>  <math>s_{44}, s_{55}, \epsilon</math>  <math>E_{11}</math></p>
	<p>Dickenschwinger</p>  <p>Längsschwinger</p>  <p>Ringschwinger</p> 	<p><math>d_{33}, g_{33}, k_{33}</math>  <math>s_{33}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p> <p><math>d_{31}, g_{31}, k_{31}</math>  <math>s_{11}, \epsilon</math>  <math>E_{33}</math></p>



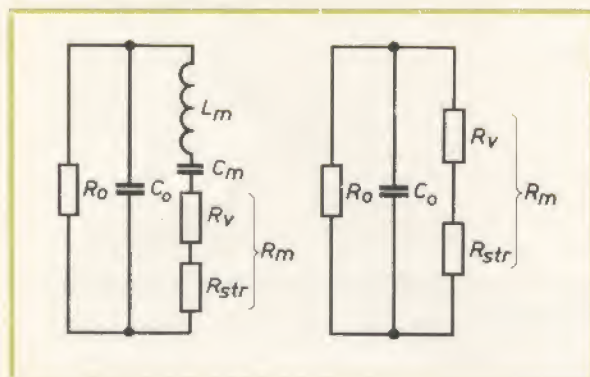
Die Kontaktierung und Polarisierung erfolgt danach im allgemeinen wie folgt:

runde Scheiben	Polarisationsrichtung	Elektrodenanordnung
Platten	axial (in der Dicke)	auf den ebenen Flächen
Ringe	axial (in der Dicke)	auf den ebenen Flächen
Rohre	axial (in der Dicke)	auf den ebenen Flächen
	radial (in der Wanddicke)	auf den inneren und äußeren Wänden

Bei Anforderung können auch andere Kontaktierung und Polarisationsrichtung gewählt werden (siehe auch Scherschwinger). Unpolarisierte Wandler werden grundsätzlich nicht ausgeliefert.

## 5. Piezoelektrischer Resonator

Piezoelektrische Elemente lassen sich durch ein elektrisches Wechselfeld mit der entsprechenden Frequenz zu ihrer mechanischen Eigenresonanz anregen. Die Eigenschaften eines solchen mechanisch schwingenden Systems lassen sich aus einem elektrischen Ersatzschaltbild ableiten. Für einen Ultraschallschwinger besteht das Ersatzschaltbild in erster Näherung aus den dargestellten Elementen.



Elektrisches Zweipolersatzschaltbild eines piezoelektrischen Ultraschallstrahlers in der Umgebung der Resonanz und bei Resonanz

- $C_0$  = normale elektrische Kapazität
- $C_1$  = dynamische Kapazität
- $L_1$  = dynamische Induktivität
- $R_v \approx R_l$  = Verlustwiderstand
- $R_{str}$  = Strahlungswiderstand bei Ankopplung an ein Medium (im Leerlauf  $R_{str} = 0$ )

Die hauptsächlichen Eigenwerte, Serienresonanz- und Parallelresonanzfrequenz bzw. die Daten des elektrischen Ersatzschaltbildes, liefern die elastischen, dielektrischen und piezoelektrischen Konstanten.

Frequenzkonstante N

Für Serienresonanzfrequenz eines piezoelektrischen Resonators sind die Geometrie, die elastischen Eigenschaften und auch die Polarisationsrichtung maßgebend. Sie läßt sich für den jeweils in Betracht kommenden Schwingungszustand aus der zugehörigen „Frequenzkonstante“ N bestimmen:

$$N = f \cdot l = \frac{F}{2} \sqrt{\frac{q}{\rho}}$$

$q$  = effektiver Elastizitätsmodul

$\rho$  = Dichte des Materials

$F$  = Formfaktor

$l$  = lineare Abmessung (Dicke, Länge), die die Frequenz bestimmt

Mechanische Güte Q

Durch den piezoelektrischen Effekt läßt sich die mechanische Güte in der Umgebung der Serienresonanz aus den Ersatzdaten  $R_1$  (im Leerlauf,  $R_{str} = 0$ ) und  $C_1$  bzw.  $C_0$  bestimmen.

$$Q = \frac{1}{4\pi (f_p - f_s) R_1 \cdot C_0}$$

Wirkungsgrad eines Ultraschallschwingers

Im Resonanzfall verteilt sich die Klemmenspannung auf die beiden Widerstände  $R_v$  und  $R_{str}$ . Demzufolge kann auch die gesamte zugeführte elektrische Leistung in akustische Leistung umgesetzt werden. Der Wirkungsgrad eines Ultraschallschwingers ist

$$\eta = \frac{R_{str}}{R_m}$$



## 6. Abgrenzung der Einsatzmöglichkeiten

Die Piezokeramiken liefern elektroakustische Bauelemente, bei denen sowohl der direkte als auch der reziproke Piezoeffekt unter Einhaltung der linearen Beziehungen ausgenutzt wird. Im Gegensatz zu Quarzschwingern sind piezokeramische Schwinger sehr niederohmig, die Anregung wird dadurch vereinfacht. Zudem besitzen die Piezokeramiken einen wesentlich größeren reziproken Piezoeffekt und werden daher vorzugsweise für Ultraschallgeber eingesetzt. Dabei zeichnen sie sich durch eine hohe mechanische Festigkeit und Feuchteunempfindlichkeit aus und sind in einem relativ großen Temperaturbereich, die Bleizirkonattitanatwerkstoffe im allgemeinen bis 200 °C, einsetzbar, ohne eine bedeutende Änderung der elektromechanischen Eigenschaften zu zeigen.

Auf Grund ihrer ferroelektrischen Struktur sind gepolte Keramiken unter dem Einfluß großer Druckamplituden und hoher elektrischer Feldstärken de-

polarisierbar. Unter normalen Betriebsbedingungen treten solche Depolarisationserscheinungen nicht auf, bei außergewöhnlich hohen Belastungen sollten jedoch die Grenzbedingungen beachtet werden. Der endliche und in größeren Bereichen stark temperaturabhängige Isolationswiderstand begrenzt die Anwendung des direkten Effektes für Meßzwecke bei tiefen Frequenzen und insbesondere bei statischen Belastungen.

### Alterung

Die meisten Eigenschaften piezokeramischer Materialien ändern sich merklich mit der Zeit. Die Alterung von verschiedenen Eigenschaften hängt von der keramischen Zusammensetzung und der Herstellungsweise der keramischen Körper ab. Die Änderungen verlaufen etwa logarithmisch mit der Zeit nach der Polarisation. Exakte Größen für elastische Konstanten, Dielektrizitätskonstanten und Kopplungsfaktoren können wegen der Alterung nur für eine definierte Zeit nach der Polarisation, i. a. nach 24 Stunden, angegeben werden.

## 7. Typische Daten der piezoelektrischen Keramiken

### 7.1. Kleinsignalwerte

Symbol	Dimension	Piezolan A	Piezolan F	Piezolan L	Piezolan S	Piezolan S 2	Piezolan T
<b>Mechanische Eigenschaften</b>							
$E$	$10^3 \text{ kg m}^{-3}$	5,5	7,3	7,5	7,5	7,85	7,8
$s_{33}^E$	$10^{-12} \text{ N}^{-1}$		14,4	14,9	17,6	18,0	12,0
$s_{11}^E$			12,3	8,7	15	14,7	11,4
$s_{55}^E$			35,2	32	34	45	30,7
$s_{12}^E$			-4,4	-2,8	-4,8	-3,7	
$s_{13}^E$			-4,7	-7,7	-6,0	-4,2	
$d_{33}^D$			13,3	10,4	11,7	9,4	
$d_{11}^D$			11,6	8,2	13,8	13,1	
$d_{55}^D$			23,6	23,2	21,8	26,2	
$c_{33}^E$	$10^{10} \text{ Nm}^{-2}$		11,2	13,5	13,2	8,5	
$c_{33}^D$			16,3	15,9	16,9	16,3	
$c_{55}^D$			2,8	4,3	4,6	3,8	
$E$			0,36	0,32	0,32	0,40	
$Q_r$		150	450	350	80	100	360
<b>Dielektrische Eigenschaften</b>							
$\epsilon_{33}^T$		1000	1000	800	800	2200	1200
$\epsilon_{11}^T$			1040	880	1040	1980	1430
$\epsilon_{33}^S$			670	570	320	1130	
$\epsilon_{11}^S$			730	630	665	665	
$\tan \delta \cdot 10^3$		15	15	8	25	15	5

Symbol	Dimension	Piezolan A	Piezolan F	Piezolan L	Piezolan S	Piezolan S 2	Piezolan T
<b>Elektromechanische Eigenschaften</b>							
$k_r$		0,30	0,45	0,45	0,48	0,60	0,40
$k_{33}$		0,42	0,57	0,55	0,58	0,69	
$k_{31}$		0,18	0,26	0,26	0,28	0,33	0,23
$k_{15}$			0,55	0,53	0,60	0,65	0,59
$k_t$			0,42	0,40	0,47		
$d_{33}$	$10^{-12} \text{ mV}^{-1}$	120	205	200	215	380	210
$d_{31}$		-50	-85	-60	-90	-150	-80
$d_{15}$			310	265	380	520	370
$g_{33}$	$10^{-3} \text{ mN}^{-1}$	11,9	23	27,5	31	20	
$g_{31}$			-9,5	-8,5	-14,9	-9,5	-7,7
$g_{15}$			34	34	49	35	29
$e_{33}$	$\text{Nm}^{-1} \text{ V}^{-1}$	11	12,5	12			
$N_r$	$\text{Hz} \cdot \text{m}$	3000	2300	2200	2150	2100	
$N_l$		2300	1670	1680	1540	1690	1620
$N_d$		2500	1950	2100	2000	2150	
$N_s$			1050	1060	1030	950	1020

Anmerkung zu den Werkstoffdaten:

Für die Bestimmung verschiedener Konstanten sind entsprechend den genannten Anregungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung der Orientierung verschiedene Wandlerformen mit definierten geome-

trischen Verhältnissen erforderlich. Im allgemeinen sind die in der Praxis gebräuchlichen Abmessungen für die Messung bestimmter Konstanten wenig geeignet. Zudem sind die angegebenen Werte Richtgrößen. Für die Lieferung sind jeweils die im Typensortiment genannten Bedingungen verbindlich.

## 7.2. Temperatur- und Zeitstabilität

Eigenschaft	Piezolan A	Piezolan F	Piezolan L	Piezolan S	Piezolan S 2	Piezolan T
Curietemperatur °C	150	290	300	350	270	350
Max. Einsatztemp. °C	100	160	150	200	150	120
Änderung d. Resonanzfrequenz im Bereich von -40 °C bis +60 °C %	4	0,2	1,5	4		0,5
Spez. Widerstand Ohm m						
25 °C	$10^{10}$	$5 \cdot 10^8$	$10^{10}$	$10^{11}$		$5 \cdot 10^9$
100 °C	$5 \cdot 10^8$	$10^7$	$5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$		
Zeitkonstante s						
25 °C	100	5	200	1000		
100 °C	5	0,1	10	40		
Alterung der Resonanzfrequenz %/Dekade		+0,2	+0,4			+0,2
Alterung von $k_r$ %/Dekade	-10	-1	-2	-4		



### 7.3. Großsignalwerte

Eigenschaften	Piezolan A	Piezolan L	Piezolan S
Durchschlagsfestigkeit im Gleichfeld, E	20	50	50
Depolarisationsfeldstärke (50-Hz-Wechselfeld)	3	6	8,5
Wechselfeld für $\tan \delta = 0,04$ , 25 °C	1,5	0,2	3
prozentualer Anstieg von $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ bei der obigen Feldstärke	5	10	20
Zugfestigkeit, statisch	300	400	400
Druckfestigkeit, statisch	1500	2500	2500
max. Betriebsdruck	100	100	500
Depolarisation bei max. Betriebsdruck		-0 %	-5 %

(elektrische Feldstärke in  $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  oder  $10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , mechanische Festigkeit in  $10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ )

## 8. Allgemeine Charakteristik der Piezolan-Werkstoffe und Hinweise für die Anwendung

**Piezolan A** ist ein Bleibariumtitanat, das eine Curie-temperatur von 150 °C besitzt und überall da eingesetzt werden kann, wo hohe Betriebstemperatur und hohe Empfindlichkeit nicht erforderlich sind. Früher erfolgte der Einsatz vor allem als Ultraschall-schwinger in vielfältigen Formen. Die geringe Stabilität des Werkstoffes und die begrenzte Leistungsfähigkeit erfordert in vielen Fällen den Einsatz von besseren, für die jeweilige Anwendung spezifischen Werkstoffen. Wandler aus Piezolan A sind deshalb mit Ausnahme von Rohren nicht für Neuentwicklungen einzusetzen.

**Piezolan F** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit ausgezeichneten Eigenschaften für Anwendungen in der Nachrichtentechnik: gute thermische und zeitliche Stabilität, hoher Kopplungsfaktor und geringe mechanische Verluste. Vorzugsweise wird dieses Material für elektromechanische Frequenzfilter verwendet (vgl. hierzu die diesbezügliche Dokumentation).

Der Scherkopplungsfaktor ist ausreichend groß für den Einsatz von Piezolan F-Wandlern in Ultraschallverzögerungsleitungen, z. B. für Farbfernsehempfänger.

Die Lieferung von Piezolan F-Wandlern erfolgt nach besonderer Vereinbarung.

**Piezolan L** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit hoher Zuverlässigkeit beim Einsatz für leistungsfähige Ultraschallschwinger, vorzugsweise in der Ultraschallerzeugung, Echolotung und in der Medizinelektronik. Das Material besitzt eine hohe elektrische und mechanische Festigkeit. Der Curiepunkt liegt bei etwa 300 °C. Besonders geeignet ist Piezolan L auch für Piezozünder.

**Piezolan S** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit großer Empfindlichkeit (großer elektromechanischer Kopplungsfaktor, große g-Konstante) und ist über einen großen Temperaturbereich besonders für Schwingungsaufnehmer geeignet. Der Einsatz ist bis etwa 200 °C möglich. Die niedrige mechanische Güte begünstigt den Impulsbetrieb (Materialprüfung). Typische Anwendungen sind Elemente für Tonabnehmer, Mikrofone, Hydrofone und elektrooptische Modulatoren in der Lasertechnik.

**Piezolan S 2** ist ein modifiziertes Bleizirkonattitanat mit hoher Dielektrizitätskonstante und großem piezoelektrischen Effekt. Elektromechanische Wandler aus diesem Material werden vorzugsweise als Biegeelemente ausgeführt, die in Schallwandlern (Mikrofone, Ohrhörern), Tonabnehmern, Stellgliedern und Relais sowie Luft-Ultraschallschwingern zum Einsatz kommen können.

## 9. Typensortiment

Das Standardlieferprogramm umfaßt einige besonders gekennzeichnete Vorzugstypen, die nach Möglichkeit von den Anwendern eingesetzt werden sollten. Für diese Erzeugnisse existieren spezielle Lieferbedingungen. Für die jeweiligen geometrischen Formen werden die möglichen Abmessungen und Resonanzfrequenzen angegeben. Nach Vereinbarung sind auch Spezialanfertigungen möglich, insbesondere für Neuentwicklungen.

Die Kontaktierung der Wandler erfolgt im allgemeinen durch Silberelektroden, die bei hohen Temperaturen eingebrannt wurden. Diese Silberelektroden sind etwa  $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$  stark, und die Haftfestigkeit beträgt ca.  $250\text{ kp}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

In speziellen Fällen, insbesondere für Wandler im hochfrequenten Gebiet können die Elektroden auch im Vakuum aufgedampft sein, als Elektrodenmetall kommt dann vorzugsweise Kupfer in Frage.

Für die Formen der Elektroden bestehen folgende Möglichkeiten

- Vollversilberung der gegenüberliegenden Elektrodenflächen
- Versilberung mit Isolationsrand
- Sonderversilberung (insbesondere bei Schwingern für Tastköpfe zur Materialprüfung)

Bei der Wahl der Polarisationsrichtung ist zu beachten, daß die geometrische Abmessung in Polarisationsrichtung stets  $\leq 25\text{ mm}$  bleibt.

Bei der Messung der elektromechanischen Eigenschaften von bestimmten Wandlern des Sortiments treten Diskrepanzen in den Werkstoffdaten auf, die folgende Ursachen haben können:

Die Werkstoffdaten werden nicht erreicht, da das Material nicht auspolariert ist (geometrische Abmessung in Polarisationsrichtung!)

In das Material ist Elektrodenmetall eindiffundiert (merklich bei sehr dünnen Platten und Stäben).

Die Wandler haben spezielle Elektroden.

Es wirken Formfaktoren, denn die definierten elektromechanischen Konstanten können nur bei Einhaltung bestimmter geometrischer Verhältnisse gemessen werden.

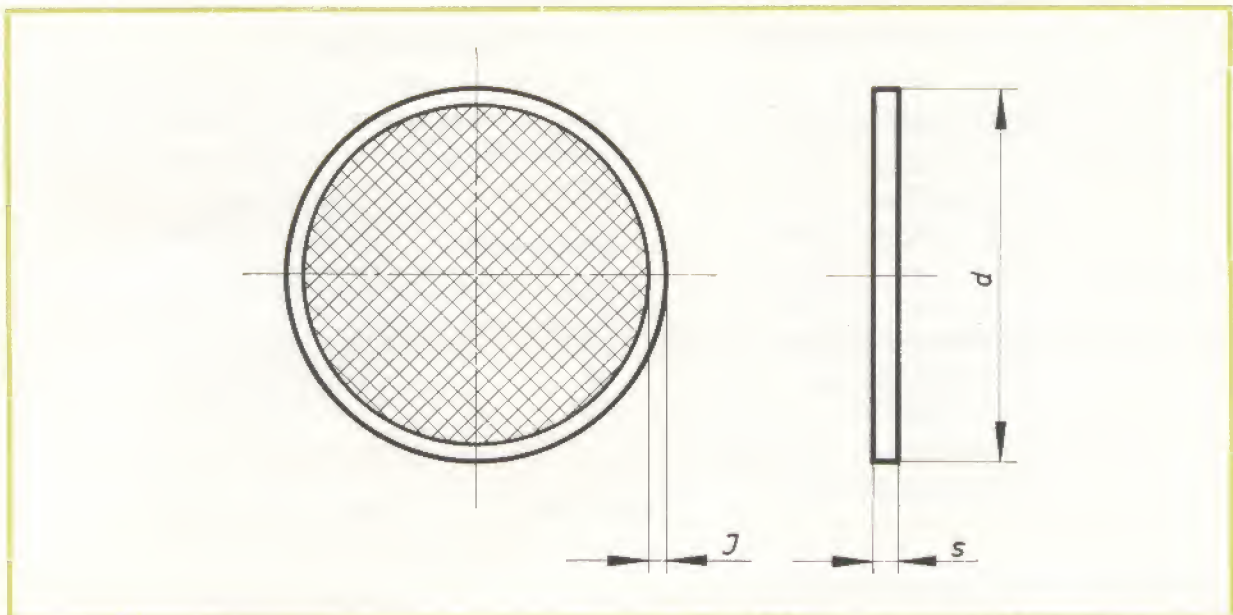
Anregungsart	Konstanten	Abmessungen
Flächendehnung, radial	$k_r$	$\frac{D}{s} > 10$
Längsdehnung, transversal	$k_{31}, g_{31}, d_{31}$	$\frac{l}{s} : \frac{l}{b} > 10$
longitudinal		
Scherung	$k_{15}, g_{15}, d_{15}$	$l > 2b$



**Runde Platten als Dickenschwinger  
aus Piezolan L und S**

1571.3

J = 0 mm, oder  
J = 1 mm bis 40 mm Ø  
J = 1,5 mm ab 40 mm Ø



**Standarddurchmesser und -Resonanzfrequenzen  
der Dickenschwingung**

Frequenz (MHz)

Durch- messer in mm	10	7,5	6	5	4	3	2,4	2	1,5	1,25	1	0,8	0,5	0,4	0,25
3	2136*	2135	2134	2133	2132	2131									
5	2236	2235	2234	2233	2232	2231									
8	2336	2335	2334	2333	2332	2331	2329	2328	2327						
10	2436	2435	2434	2433	2432	2431	2429	2428	2427	2426	2425				
12	2536	2535	2534	2533	2532	2531	2529	2528	2527	2526	2525				
14	2636	2635	2634	2633	2632	2631	2629	2628	2627	2626	2625	2624	2623		
15	2736	2735	2734	2733	2732	2731	2729	2728	2727	2726	2725	2724	2723		
20	2836	2835	2834	2833	2832	2831	2829	2828	2827	2826	2825	2824	2823	2822	2821
25			2934	2933	2932	2931	2929	2928	2927	2926	2925	2924	2923	2922	2921
30							3129	3128	3127	3126	3125	3124	3123	3122	3121
31							3229	3228	3227	3226	3225	3224	3223	3222	3221
40								3328	3327	3326	3325	3324	3323	3322	3321
50									3427	3426	3425	3424	3423	3422	3421
54									3527	3526	3525	3524	3523	3522	3521
60									3627	3626	3625	3624	3623	3622	3621
75									3727	3726	3725	3724	3723	3722	3721

\* Typen-Nummer vollständig 1571.3-2136 . . . , ein-  
schl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan A = 91, Piezolan  
S = 92 und Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei  
Bestellung anzugeben.

Standardtypen mit laufender Typ-Nr., davon sind die Typen Nr. 1571.3-2624 und Nr. 1571.3-3224 auch noch aus Piezolan A lieferbar, als Lieferbedingung ist 1571.03 LV Bl. 5.7 verbindlich.

**Toleranzen und Grenzen der Abmessungen:**

bis 50 mm  $\varnothing \pm 0,1$  mm    kleinster  $\varnothing$  3 mm  
über 50 mm  $\varnothing \pm 0,2$  mm    größter  $\varnothing$  75 mm

geringste Dicke    1.  $\varnothing$  bis 30 mm    0,2 mm  
                               2.  $\varnothing$  bis 40 mm    0,5 mm  
                               3.  $\varnothing$  bis 60 mm    1,0 mm

größte Dicke                                    25,0 mm

**Toleranz der Resonanzfrequenz (Dickenschwingung)**

bis 1 MHz  $\pm 2$  und  $\pm 5$  %  
bis 5 MHz                     $\pm 5$  %  
über 5 MHz                   $\pm 10$  %

Nach Vereinbarung sind auch andere Resonanzfrequenzen (Dicken) und Platten mit Bohrung möglich.

**Spezialfälle:**

**Für Ultraschallreinigung u. ä.:**

Platte 50 mm Durchmesser, 6 mm Dicke aus Piezolan L für Hochleistungs-Sandwichschwinger unterhalb 100 kHz, Typ.-Nr. 1571.3-3451 nach 1571.03 LV, Bl. 1-4.

**Für Echolote:**

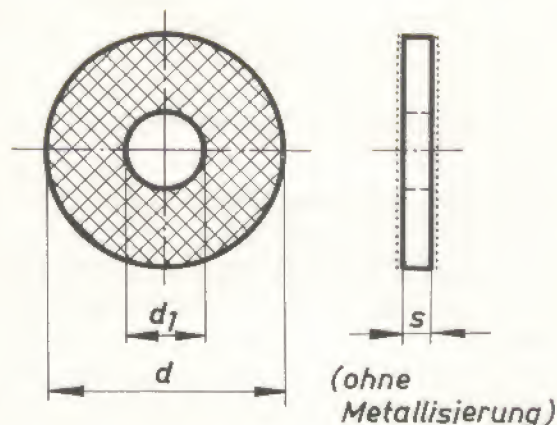
Platte 25 mm Durchmesser, 180 kHz Dickenschwingung, aus Piezolan L

**Runde Platten mit Bohrung aus Piezolan L**

(für Hochleistungs-Sandwichschwinger unterhalb 100 kHz)

1571.3

Die Platten können auch mit geläppten Oberflächen ohne Elektroden geliefert werden.



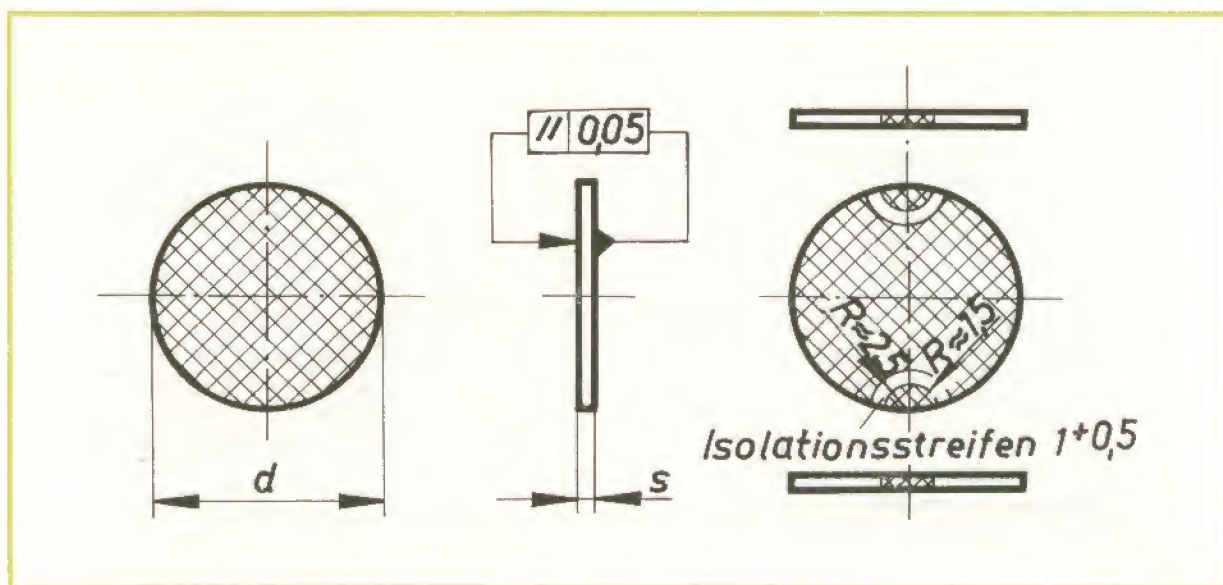
Typ-Nr.	$d \pm 0,1$ mm	$d_1 \pm 0,1$ mm	$s \pm 0,1$ mm
5351*	30	15	6
5151	35	15	6
5551	50	15	6
5451	50	20	6

\* vollständige Typ-Nr. 1571.3-5351.94



**Runde Platten als Dickenschwinger**  
**aus Piezolan S und Piezolan S 2**  
 mit Versilberungsart  $S_2 + S_4$

1571.3

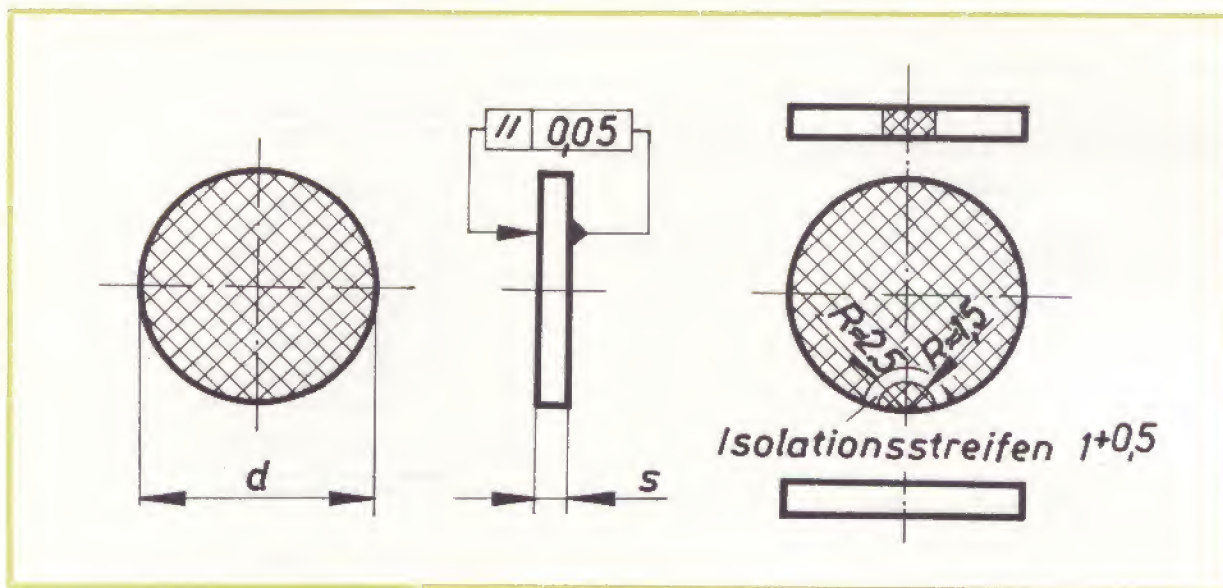


Durchmesser in (mm)	Frequenz (MHz)	10	7,25	6	4	2	1
10		7136*	7146	7134	7132	7128	7125
12		7236	7246	7234	7232	7228	7225
15		9736	9746	9734	9732	9728	9725
20		7536	7546	7534	7532	7528	7525
25		7636	7646	7634	7632	7628	7625
30		7836	7846	7834	7832	7828	7825

\* vollständige Typ-Nr. 1571.3–7136.92 (.92 für Piezolan S,  
 für Piezolan S 2: .97)

**Runde Platten als Dickenschwinger  
aus Piezolan S und Piezolan S 2  
mit Versilberungsart S<sub>5</sub>**

1571.3



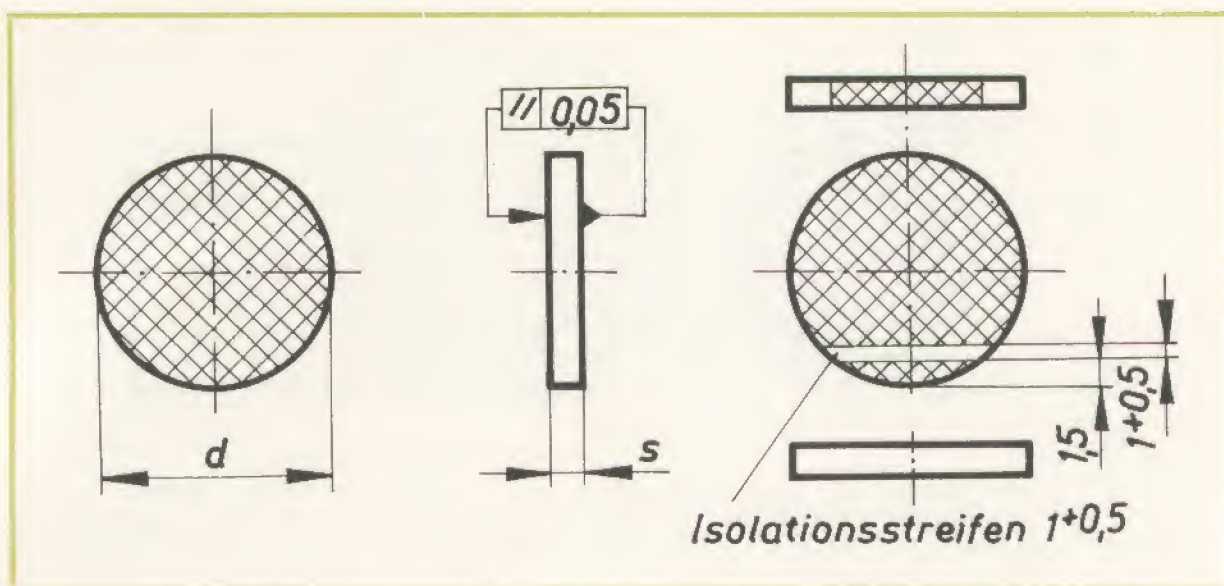
Durchmesser in (mm)	Frequenz (MHz)	10	7,25	6	4	2	1
10		8836*	8846	8834	8832	8828	8825
12		8936	8946	8934	8932	8928	8925
15		9236	9246	9234	9232	9228	9225
20		9336	9346	9334	9332	9328	9325
25		9436	9446	9434	9432	9428	9425
30		9636	9646	9634	9632	9628	9625

\* vollständige Typ-Nr. 1571.3—8836.92 (.92 für Piezolan S.  
für Piezolan S 2: .97)



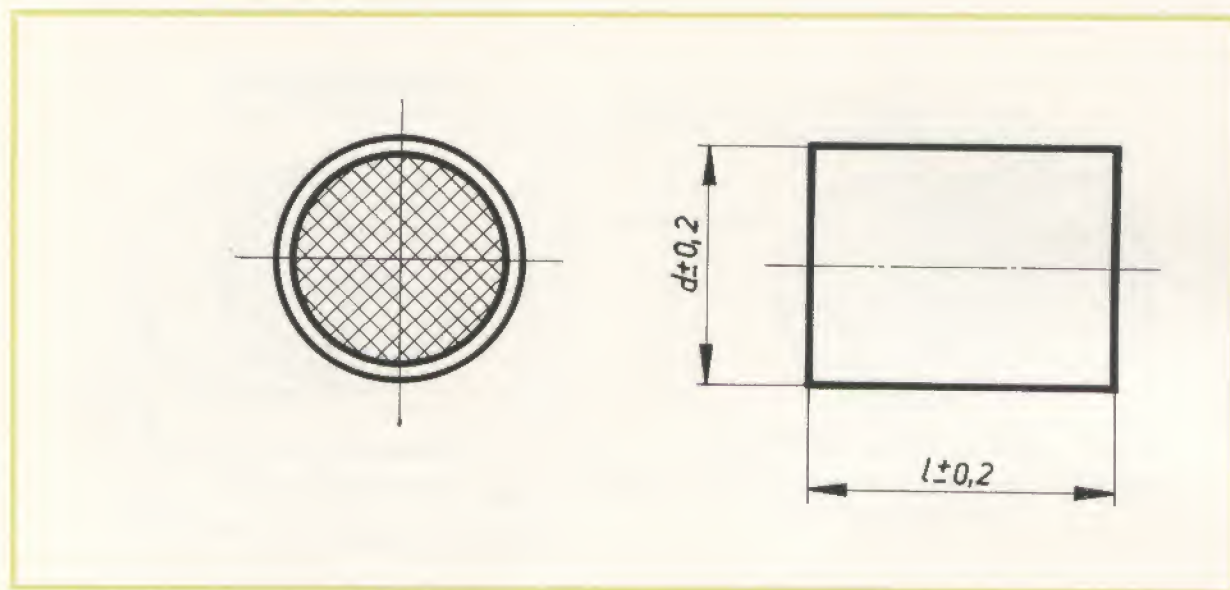
**Runde Platten als Dickenschwinger  
aus Piezolan S und Piezolan S 2  
mit Versilberungsart S<sub>3</sub>**

1571.3



Durchmesser in (mm)	Frequenz (MHz)	10	7,25	6	4	2	1
10		7936*	7946	7934	7932	7928	7925
12		8136	8146	8134	8132	8128	8125
15		8336	8346	8334	8332	8328	8325
20		8436	8546	8434	8432	8428	8425
25		8536	8446	8434	8532	8528	8525
30		8736	8746	8734	8732	8728	8725

\* vollständige Typ-Nr. 1571.3–7936.92 (.92 für Piezolan S,  
für Piezolan S 2: .97)



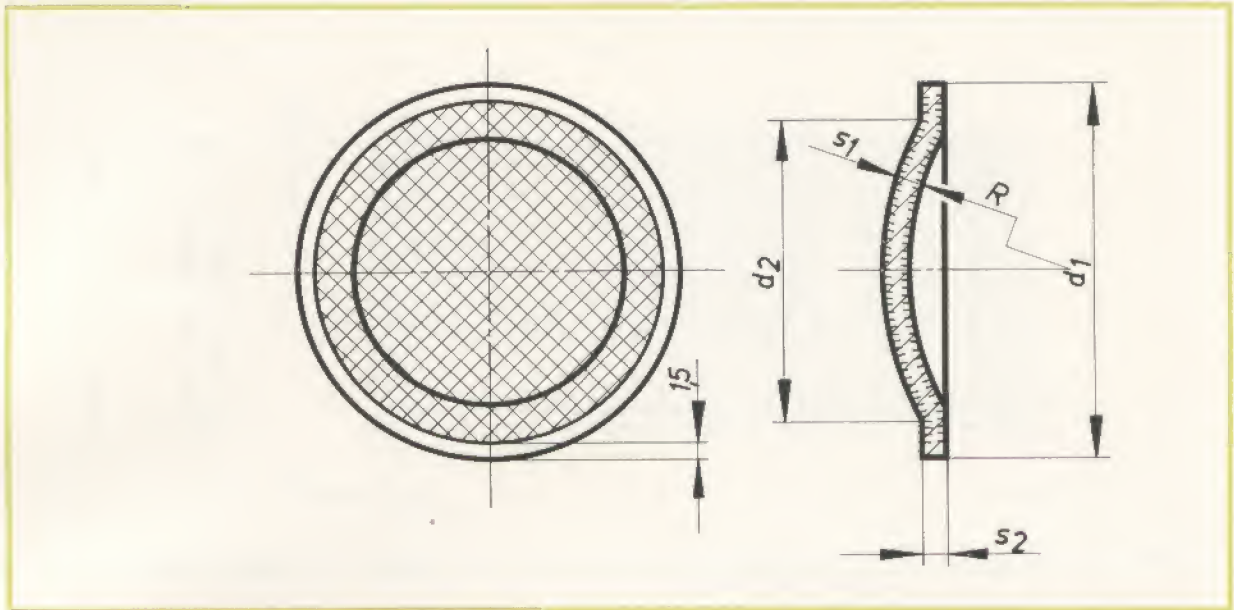
Typ-Nr.	d	l
2324*	16	20
2223	7	15
2222	7	10
2622	5	10
2526	4	6
2425	3	5
2428	3	4

\* vollständige Typ-Nr. 1577.3-2324.94



# Fokusschwinger aus Piezolan L

1571.3



Dicken- Resonanz- frequenz (MHz)	$d_1/d_2$ (mm)	R (mm)	
		50	75
0,8	40/35,5	1112*	
	54/44	1121	1122
	75/65	1131	1132
0,4	75/65		1133

\* Typen-Nummer, vollständig: 1571.3-1121 ..., einschl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei Bestellung anzugeben.

Für die übrigen Typen entsprechend.

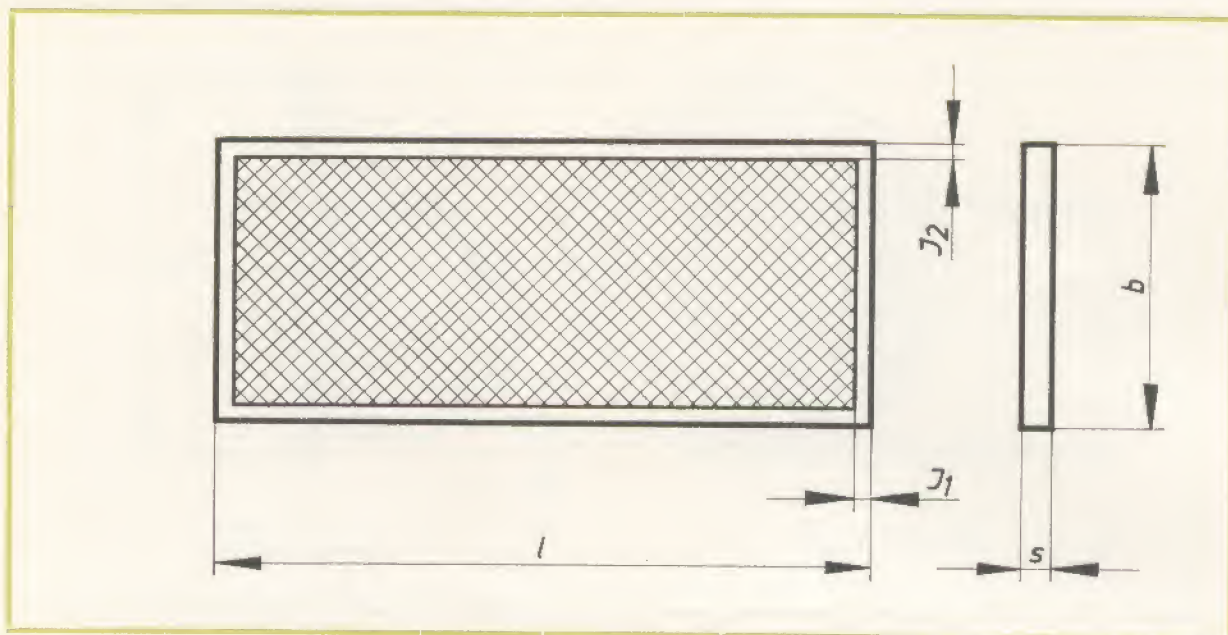
Für den Schwinger 1571.3-1122 aus Piezolan L erfolgt die Lieferung nach 1571.01 LV, Bl. 1–3.

Der Schwinger 1571.3-5015 wird nach 1571.01 LV, Bl. 4, auch noch aus Piezolan A geliefert (nicht für Neuentwicklungen!)

Andere, nicht in der Tabelle gekennzeichnete Geometrien und Resonanzfrequenzen können nur nach besonderer Vereinbarung geliefert werden.

Typ-Nr.	$d_1 \pm 0,1$ (mm)	$d_2 \pm 0,1$ (mm)	R (mm)	Dicken-Resonanzfrequenz (MHz)
1112*	40	35,5	50	0,800
1121	54	44	50	0,800
1122	54	44	50	0,800
1131	75	65	75	0,800
1132	75	65	75	0,800
1133	75	65	75	0,400

\* vollständige Typ-Nr. 1571.3–1112.94



Standardabmessungen und -Resonanzfrequenzen der Dickenschwingung

Frequenz (MHz)

L × b (mm)	10	7,5	5	4	2	1	0,8	0,5	0,4	0,3
2,5 × 10*	2131	2129	2128	2127	2126					
5 × 10	2231	2229	2228	2227	2226					
7 × 10	2331	2329	2328	2327	2326	2325				
10 × 10	2431	2429	2428	2427	2426	2425				
10 × 15	2531	2529	2528	2527	2526	2525	2524			
10 × 17	2631	2629	2628	2627	2626	2625	2624			
10 × 20	2731	2729	2728	2727	2726	2725	2724			
13 × 24	2831	2829	2828	2827	2826	2825	2824			
15 × 15	2931	2929	2928	2927	2926	2925	2924			
15 × 16	3131	3129	3128	3127	3126	3125	3124			
15 × 18	3231	3229	3228	3227	3226	3225	3224	3223		
20 × 25	3331	3329	3328	3327	3326	3325	3324	3323	3322	3321
25 × 25	3431	3429	3428	3427	3426	3425	3424	3423	3422	3421

Oberhalb 1 MHz nur aus Piezolan S. Standardtypen mit laufender Typ-Nr., bei Bestellung anzugeben.

Toleranz der Abmessungen und Resonanzfrequenz (Dickenschwingung) Länge, Breite  $\pm 0,1$  mm

Resonanzfrequenz bis 5 MHz  $\pm 5\%$   
bis 10 MHz  $\pm 10\%$

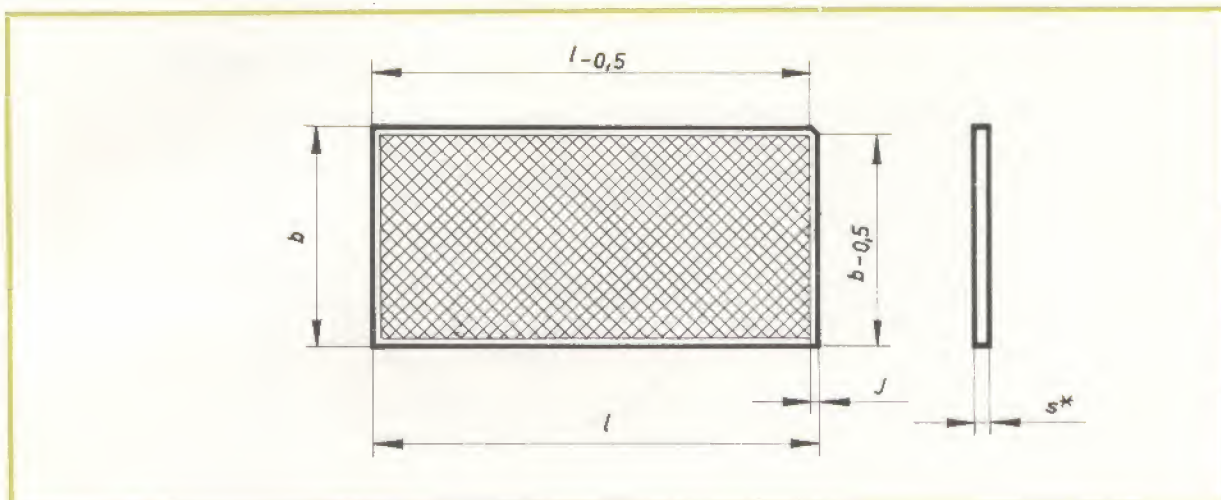
Grenzen der Abmessungen für Sonderfälle  
kleinste Kantenlänge 1 mm, jedoch nicht kleiner als geringste Dicke

größte Kantenlänge 90 mm

geringste Dicke 1. bis 30 mm Kantenlänge 0,2 mm  
2. bis 40 mm Kantenlänge 0,5 mm  
3. bis 60 mm Kantenlänge 1,0 mm  
4. bis 90 mm Kantenlänge 3,0 mm

größte Dicke 25 mm, jedoch nicht größer als kleinere Kante





Typ-Nr.	l	b	s**
5151*	10	6	0,25
5252	12	10	0,25
5352	15	10	0,25

\* vollständige Typ-Nr. 1572.3–5151.95 (.95 für Piezolan F, für Piezolan T: .96)

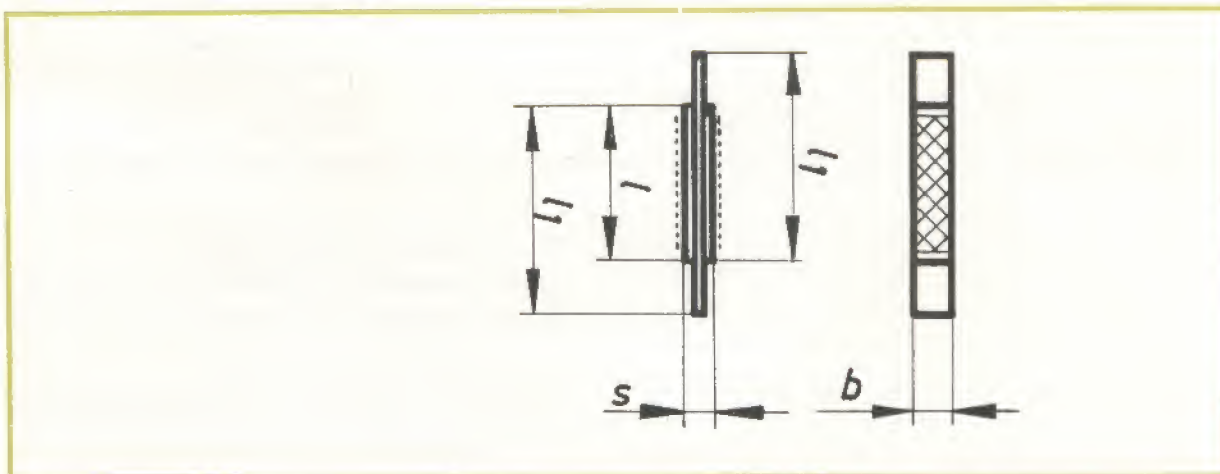
\*\* s entsprechend der Toleranz der Resonanzfrequenz (vorzugsweise  $f_s = 4,2 \pm 0,2$  MHz)

Elektrodenmaterial: Cu 0,5–1,0  $\mu$ m, lötfähig.

### Stabförmige Biegeelemente aus Piezolan S 2

als elektroakustische Wandler und Stellglieder  
(zwei Stäbe mittels Epoxidharz verklebt)

1572.5



1. Vorzugstype 1572.5–8181.00: elektrische Parallelschaltung der beiden Teilelemente, mit den Abmessungen  $10 \times 2,4 \times 0,5$ ; Kupferfolie als mittlere Elektrode
2. Vorzugstype 1572.5–8382.00: elektrische Reihenschaltung der beiden Teilelemente, mit den Abmessungen  $14 \times 1,8 \times 0,5$

3. Mögliche Abmessungen der Biegeelemente in elektrischer Reihenschaltung (auf besondere Anfrage):

$$l = 10 \dots 55 \text{ mm}$$

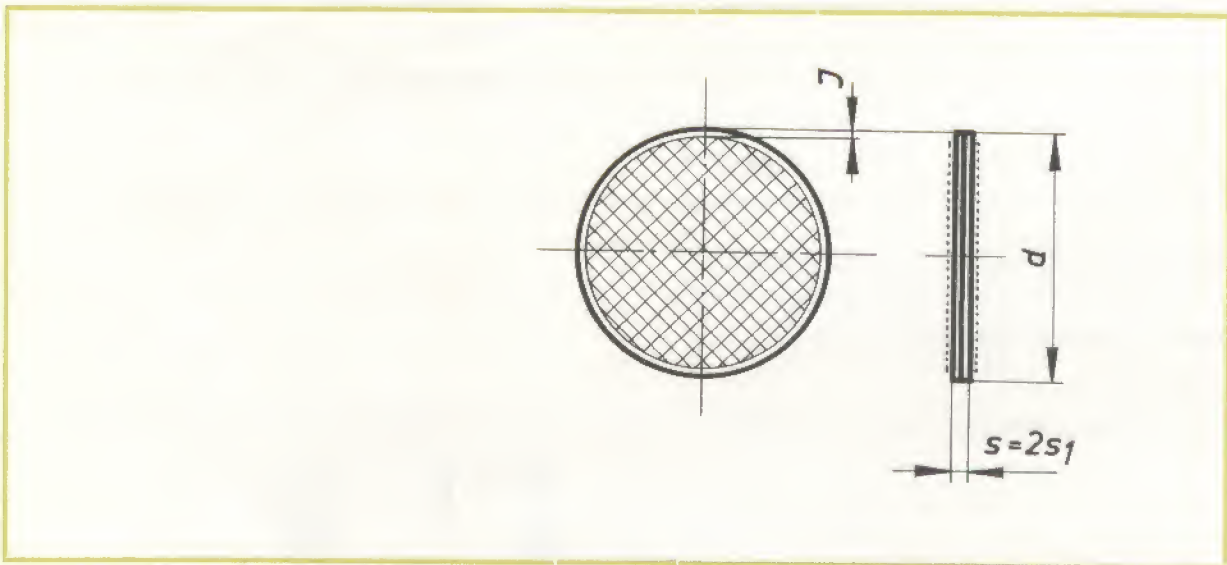
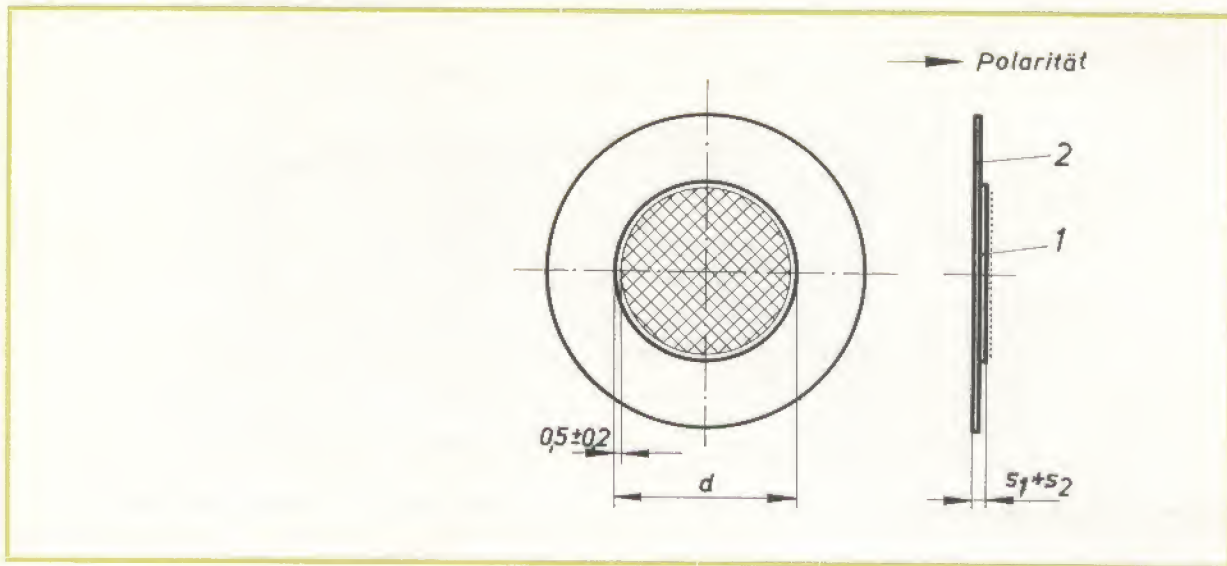
$$b = 1,0 \dots 20 \text{ mm}$$

$$s = 0,2 \dots 1,0 \text{ mm}$$

für die einzelnen Stäbe

## Biegeplatten aus Piezolan S 2

(Verklebung der Teilelemente mit Epoxidharz)

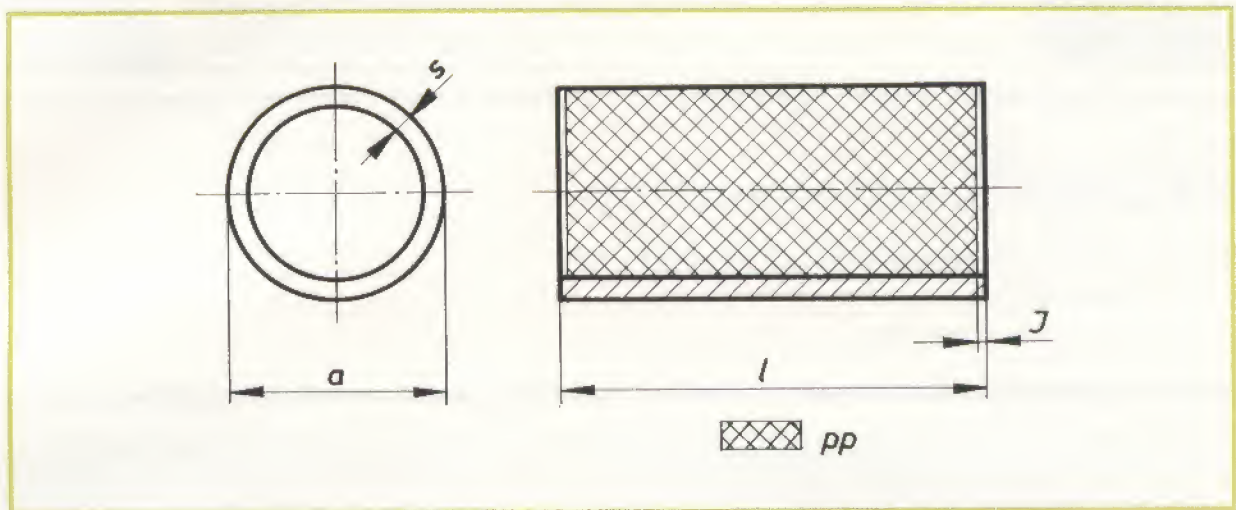


1. Vorzugstype (in Vorbereitung):  
Keramikscheibe  $d_1 = 20 \text{ mm } \varnothing$ ,  $s_1 = 0,2 \text{ mm}$  auf  
Neusilbermembran  $d_2 = 34 \text{ mm}$ ,  $s_2 = 0,15 \text{ mm}$
2. Vorzugstype (in Vorbereitung):  
Doppelplatte, bestehend aus zwei elektrisch in  
Reihe geschalteten Einzelplatten  $d = 20 \text{ mm}$ ,  
 $s_1 = 0,2 \text{ mm}$
3. Mögliche Abmessungen der Biegeplatten  
(auf besondere Anfrage)  
 $d = 10 \dots 30 \text{ mm}$   
 $s_1 = 0,2 \dots 1 \text{ mm}$  für die einzelnen Keramik-  
platten



## Rohrförmige Piezolanschwinger

1573.3



Standardabmessungen für Rohre aus Piezolan A und Piezolan S

Länge l (mm)	Innenradius (mm)	Wandstärke (mm)	lfd. Typ-Nr.
7	0,35	0,3	7221*
15	3,0	2,0	3185
20	1,0	3,0	2221
25	6,8	3,2	4153
25	10,5	1,5	4541
25	20,0	3,2	4651
25	30,0	3,2	4751
30	4,0	1,0	5331
30	8,5	1,5	5441
30	10,0	1,5	5541
75	15,0	3,2	6156
75	30,0	3,2	6751
200	20,0	3,2	7651**
200	30,0	3,2	7751**

\* Auf besondere Anfrage, Elektroden innen und außen Gold.

\*\* Auf besondere Anfrage

vollständige Typ-Nr. 1573.3-2111 ..., einschl. der Werkstoff-Nr. für Piezolan A = 91, Piezolan S = 92 und Piezolan L = 94, als elfstellige Zahl bei Bestellung anzugeben.

### Toleranz der Abmessungen

Werden Rohre mit hoher Präzision verlangt, gelten die gleichen Toleranzen wie bei Platten (Toleranzgruppe 1). Auf Grund eines anderen Herstellungsverfahrens können Rohre billiger, jedoch mit größeren Toleranzen hergestellt werden. Dafür gilt die Toleranzgruppe 2:

Rohre aus Piezolan S werden in der Hauptsache als Hydrophone eingesetzt. Für andere Anwendungen, z. B. Erzeugung von Ultraschall unterhalb 100 kHz, können nur nach besonderer Vereinbarung auch Rohre aus Piezolan L geliefert werden.

Höhe	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Durchmesser	$\pm 3,0 \%$ vom Nenndurchmesser
Wandstärke bis 3 mm	$\pm 0,2 \text{ mm}$
bis 6 mm	$\pm 0,3 \text{ mm}$
Exzentrizität	$\pm 2,0 \%$



## KOMBINAT VEB KERAMISCHE WERKE HERMSDORF

DDR - 653 Hermsdorf / Thüringen, Friedrich-Engels-Straße 79

Telefon: 510 · Telex: 058246

Telegramme: Kaweha Hermsdorf / Thür.

### WIR PRODUZIEREN:

Isolierkörper und Isolatoren  
für Apparate und Freileitungen für höchste Spannungen

Elektronische Bauelemente für die Rundfunk-, Fernseh-,  
Nachrichten-, Meß-, Steuer- und Regelungstechnik  
und für die Datenverarbeitung

Apparate und Anlagen aus Hartporzellan und Steinzeug  
für die chemische und artverwandte Industrie

Hochverschleißfeste, hochtemperaturbeständige, korro-  
sionsfeste und elektrisch maximal belastbare oxidkera-  
mische Erzeugnisse für die verschiedensten Industrie-  
zweige

Isolier- und Bauteile für Schaltgeräte, Elektrotechnik,  
Gas-, Wärme- und Beleuchtungs-Geräte  
sowie Funken- und Lichtbogenschutz

Bauteile und -elemente der HF-Technik,  
Tragkörper für Kohleschicht-, Metallschicht- und  
Drahtwiderstände

Sintermetallische Kontakt- und Stromübertragungs-  
elemente, Einbauteile für Röhrentechnik, Überscher-  
metalle als Abschirmmaterial für Gammastrahlen

Isolator-Zündkerzen für Otto-Motoren in allen  
Gewindegrößen und Wärmewerten, Rennkerzen und  
Spezialkerzen.

Wir erwarten Ihre Anfragen!